



## Scientia Agropecuaria

Facultad de Ciencias  
Agropecuarias

Universidad Nacional de Trujillo

# Modelamiento de la cinética de reacciones del pardeamiento no enzimático y el comportamiento reológico, en el proceso térmico de jugos y pulpas de fruta

## Modeling the kinetics nonenzymatic browning reactions and rheological behavior in the termal process of fruit juices and pulps

Damian Manayay<sup>1,\*</sup>, Albert Ibarz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento Académico de Agroindustria, Universidad Nacional del Santa, Av. Pacífico 508, Buenos Aires, Nuevo Chimbote, Chimbote, Ancash, Perú

<sup>2</sup> Departamento de Tecnología de Alimentos (Universidad de Lleida) Avda. Rovira Roure, 191 (25198) Lleida. España

Recibido 02 Mayo 2010; aceptado 21 Junio 2010

### Resumen

En la manufactura de jugos y pulpas de fruta, tiene singular importancia referirse al pardeamiento no enzimático y al comportamiento reológico. El pardeamiento no enzimático es un fenómeno de oscurecimiento de naturaleza exclusivamente química (Braverman, 1980), se caracteriza por la presencia de polímeros pardos llamadas melanoidinas, generadas por las reacciones de Maillard o condensación de la melanoidina, la caramelización y el deterioro del ácido ascórbico; mientras que el comportamiento reológico es la definición de la proporción de deformación del material al ser expuesta a esfuerzos de corte ( $\sigma$ ) ocasionados por un reómetro (Muller, 1978; Ibarz, 2005). Los estudios de modelamiento de la formación de color y la definición del comportamiento reológico, considerados en la presente revisión, orientan a la conclusión de la existencia de una cinética de cero y primer orden respectivamente, siendo los factores que más influyen sobre las reacciones principalmente de Maillard; temperatura, la presencia de aminoácidos, la actividad de agua y el pH, mientras que el comportamiento reológico se ve afectado por la temperatura, concentración de sólidos y el tamaño de las partículas que conforman la suspensión en el caso específico de las pulpas.

**Palabras clave:** Pardeamiento no enzimático, comportamiento reológico, cinética de pardeamiento, reología, pulpas.

### Abstract

In the manufacture of fruit juices and pulps, is of paramount importance to refer to non-enzymatic browning and rheological behavior. The non-enzymatic browning is a phenomenon of darkening of a purely chemical (Braverman, 1980), is characterized by the presence of brown polymers called melanoidins, generated by the Maillard reaction or condensation of melanoidins, the caramelization and degradation of acid ascorbic, while the rheological behavior is define as the proportion deformation of the material when exposed to shear stress ( $\sigma$ ) caused by a rheometer (Muller, 1978; Ibarz, 2005). Modeling studies of colour formation and definition of rheological behavior, considered in this review, aimed at the conclusion of the existence of a zero kinetic and first order respectively, and the most influential factors with the reactions are mainly Maillard, temperature, amino acids presence, water activity and pH, while the rheological behavior is affected by temperature, solid concentration and particles size that make up the suspension in the specific case of the pulps.

**Keywords:** non-enzymatic browning, rheological behavior, kinetics of browning, pulps, rheology.

\* Autor para correspondencia.

E-mail: [dmanayay@uns.edu.pe](mailto:dmanayay@uns.edu.pe) (D. Manayay)

## 1. Introducción

Cobra mucha importancia estudiar los efectos de los factores del tratamiento de preservación de jugos y pulpas de fruta, este interés radica en la necesidad de comprender teórica y científicamente los mecanismos que conllevan a deformar las características organolépticas naturales de estos alimentos, una de éstas características y tal vez la más importante es el color, que conforme son expuestos a los procesos de tratamiento en su manufactura, muestran deterioros que necesitan ser explicadas, principalmente definiendo el factor o factores cuya influencia es mayor para estos cambios. El pardeamiento en estos alimentos tiene dos orígenes, la primera corresponde al enzimático, que implica inicialmente la oxidación enzimática de los derivados del anillo benceno y una oxidación ulterior no enzimática, seguida de ciertas transformaciones no oxidativas y de una polimerización final (Breverman, 1978), en tanto que la segunda, correspondiente a la no enzimática, está justificada por tres mecanismos: la reacción de Maillard o condensación de la melanoidina, la caramelización y el deterioro del ácido ascórbico, cuyas secuencias de ocurrencia son explicadas en literaturas especializadas.

Por otro lado, los alimentos, además de ofrecer un olor, un color y un sabor, exhiben determinado comportamiento mecánico; reaccionan de un cierto modo cuando intentamos deformarlos. Unos fluyen fácilmente, otros con dificultad; para estimar este comportamiento mecánico, existen dos procedimientos, uno de ellos consiste en tocar, estrujar, morder o masticar el alimento y describir las sensaciones obtenidas, llamado método sensorial y otra segunda consistente en la evaluación a través de métodos físicos, en donde el valor apreciado no depende del individuo sino de la medición que se realiza instrumentalmente (Muller, 1978; Ibarz, 2005). En esencia la reología, o ciencia de la

deformación de la materia se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes (Muller, 1978; Ibarz, 2005). El comportamiento reológico, no tiene otro objetivo que definir el tipo de flujo, mediante la determinación reométrica del índice de comportamiento de flujo ( $\eta$ ). Este índice constituye una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano, es decir; si  $\eta=1$  el producto es Newtoniano, si  $\eta>1$  se produce espesamiento y el producto es dilatante; por último si  $\eta<1$  se produce aclaramiento y el material es pseudoplástico.

En el marco de esta concepción de pardeamiento no enzimático y comportamiento reológico, es que se ha revisado, sistematizado y comprendido el contenido de investigaciones realizadas en el campo de la cinética de las reacciones de pardeamiento no enzimático en jugos diluidos o concentrados y pulpas de frutas, con la idea central de justificar la fundamentación teórica y científica del tema de investigación a desarrollarse: Modelamiento de la cinética de reacciones del pardeamiento no enzimático y el comportamiento reológico, en el proceso térmico de la pulpa de mango (*Mangifera indica* L) kent y Haden.

Es importante indicar que este trabajo, no tiene otro contenido que presentar en forma resumida los resultados más saltantes a los que han arribado investigadores que año a año han dedicado su tiempo al estudio de esta temática, no dejando de mencionar que lo ideal hubiese sido encontrar mayor número de investigaciones publicadas y relacionadas con pulpa de mango u otras, sin embargo, consideramos importante valorar los referidos a zumos de frutas, que a pesar de no presentar las características de comportamiento igual a las pulpas, apertura la posibilidad teórica para discutir los resultados a los que pudiéramos arribar en la investigación planteada.

Además es importante resaltar, que esta revisión corresponde de manera puntual a los resultados de ensayar las variaciones del atributo color en jugos diluidos o concentrados y pulpas de frutas, cuando son sometidos a diferentes valores de temperatura y evaluadas en el tiempo, variaciones que pueden expresar entre otros factores, la degradación de la sacarosa en azúcares de menor peso molecular, la aparición del 5-hidroximetilfurfural (HMF) o la presencia de reacciones tipo Maillard como consecuencia del contenido de aminoácidos.

### Pardeamiento no enzimático

Gonzalez *et al.* (1988), a través de un estudio teórico de la aplicación de modelos cinéticos al pardeamiento no enzimático, sostiene que si la cinética de pardeamiento no enzimático no depende de la concentración de los componentes reaccionantes, que ocasionan la aparición de los compuestos poliméricos coloreados, tiene un comportamiento de orden cero cuyo modelo de absorbancia es:

$$A = A_0 + K_{P_0} * t \quad (1)$$

en tanto que si dependen de la concentración de compuestos poliméricos coloreados, la cinética del pardeamiento no enzimático es de primer orden, es decir:

$$A = A_0 \exp(K_{P_1} * t) \quad (2)$$

Aún cuando en la práctica no siempre ocurren de manera separada y simple, sino que más bien son procesos globales y por lo tanto pueden suceder en dos etapas inmediatas que se manifiestan en una cinética combinada de formación y desaparición de los compuestos coloreados, modelándose como:

$$\frac{dA}{dt} = K_{P_0} - K_{P_1} * A \quad (3)$$

$$A = \frac{K_{P_0}}{K_{P_1}} - \frac{K_{P_0}}{K_{P_1}} \exp(K_{P_1} * t) \quad (4)$$

siendo  $K_{P_0}$  y  $K_{P_1}$  las constantes de velocidad de orden cero de formación de color y de primer orden de desaparición de color respectivamente, mientras que la variación adimensional de la absorbancia puede expresarse como:

$$\frac{A}{A_0} = K - (K - 1) \exp(-K_{P_1} * t) \quad (5)$$

en la que  $K$  es:

$$K = \left( \frac{K_{P_0}}{K_{P_1} A_0} \right) = \left( \frac{K_{P_0}}{K_{P_1}} \right) \quad (6)$$

Asimismo, Gonzalez *et al.* (1988) al investigar el pardeamiento no enzimático de concentrado de zumo de melocotón, concluye; que la ecuación de velocidad que rige el proceso puede considerarse como una reacción de primer orden respecto a la aparición de color, en tanto que a temperaturas bajas (50° y 60°C) muestra dificultad para discernir entre una cinética de primer orden y una de orden cero, refieren además que como aporte adicional de esta investigación es la definición de la ecuación de variación de la constante de velocidad de reacción de pardeamiento no enzimático en función de la temperatura, es decir:

$$K_1 = 2.7 * 10^9 \exp(8685/T) \quad (7)$$

en donde  $K_1$  es expresada en  $\text{min}^{-1}$  y  $T$  es la temperatura absoluta (K). Por su parte, Ibarz *et al.* (1989a) e Ibarz *et al.* (1989b), define de manera categórica, que en los concentrados de zumos de frutas las reacciones de variación del color ocurren con el tiempo, siguiendo una cinética ajustada a una ley potencial:

$$\frac{dA}{dt} = K(A)^n \quad (8)$$

en la que  $A$  es una medida del color (absorbancia),  $t$  el tiempo,  $K$  la constante cinética de la reacción y  $n$  el orden de la reacción, pudiéndose describir por un modelo cinético de orden cero o de primer orden según el valor experimental de  $n$ . Vale resaltar además que en estas investigaciones los autores muestran la importancia de tener presente, que a temperaturas de 50° y 37° C, la cinética de primer orden describe mejor el pardeamiento no enzimático que se produce en los zumos de pera concentrados, en tanto que a bajas temperaturas de almacenamiento (entorno a 5° C) cualquiera de los dos modelos sirven para describir dicha cinética, determinándose por lo tanto que la temperatura es el factor preponderante en la variación de los procesos de degradación o incremento de coloraciones, que adicionado al componente actividad de agua definida como:

$$E_a = K' \exp(b^* a_w) \quad (9)$$

$$K_0 = K' \exp(b^* a_w) \quad (10)$$

en la que los parámetros de la ecuación de Arrhenius crecen con el incremento de la actividad de agua, por lo tanto ofrecen un potencial enorme de velocidad con la que variarían los fenómenos de pardeamiento no enzimático en estos alimentos.

Ibarz *et al.* (1989) al estudiar cinéticas de formación de hidroximetilfurfural (HMF) en concentrado de zumo de pera almacenada entre 25° y 50° de temperatura, destaca que el factor temperatura es preponderante en los procesos de ocurrencia del pardeamiento no enzimático, dado que logran probar que a lo largo de todo el proceso de almacenamiento, las concentraciones de glucosa y fructosa, no sufren variación apreciable y que además la concentración de HMF es despreciable. Remacha *et al.* (1992) estudia el efecto de la

temperatura (60° a 97°C) sobre pulpas de ciruela, melocotón y albaricoque, concluyendo acertadamente que la variación de los parámetros de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , definen la diferencia de color ( $\Delta E^*$ ), que a pesar de corresponder a cinéticas de orden cero y primer orden, muestra constantes cinéticas de orden cero mayores a medida que aumenta la temperatura, concordante con la teoría fundamental de pardeamiento no enzimático, que al definir “la reacción de pardeamiento no enzimático como la de Maillard se favorece a temperaturas más altas siendo además más rápidos”, respalda los resultados reportados por estos investigadores. Corresponde a Ibarz *et al.* (1993), que al someter jugo clarificado de melocotón de 64,5° Brix, en diluciones de 15°, 30°, 45° y 55° Brix a temperaturas de 100°, 102°, 104°, 106° y 108°C, reportan que la variación de las constantes cinéticas de pardeamiento con la temperatura se ajustan al modelo exponencial tipo Arrhenius

$$K = K^* \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

asimismo al sostener que la variación de la energía de activación ( $E_a$ ) y el factor de frecuencia ( $K^*$ ) para una cinética de primer orden, depende del contenido de sólidos solubles; justifican la influencia del factor temperatura en los procesos de pardeamiento no enzimático. Asimismo, Ibarz *et al.* (1995) al investigar la cinética de pardeamiento no enzimático de zumos clarificados de dos variedades de manzana (Granny Smith y Jonagold) con diferentes contenidos de sólidos solubles y tratados térmicamente a temperaturas de 60°, 70°, 80°, 85°, 90° y 95°C, muestra que el efecto de la temperatura sobre las constantes cinéticas de pardeamiento no enzimático se expresa satisfactoriamente por la ecuación de Arrhenius:

$$k = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

en tanto que la influencia del contenido en sólidos solubles sobre los parámetros de la ecuación de Arrhenius se describen mediante ecuaciones del tipo potencial:

$$E_a = aC^b \quad (13)$$

$$K_0 = aC^b \quad (14)$$

ecuaciones que permiten tener una idea concreta de la velocidad con que el proceso de pardeamiento no enzimático puede ocurrir cuando los valores de temperatura varían. En su momento, Garza *et al.* (1996) refiere que al estudiar el pardeamiento no enzimático de zumo de manzana de 11°Brix, mediante la evolución de parámetros colorimétricos (absorbancia relativa a 420 nm, diferencia de color ( $\Delta E$ ) e índice de pardeamiento), la formación de 5-hidroximetilfurfural (*HMF*) y la evolución de la concentración de azúcares (fructosa y sacarosa) en el zumo, observaron que resulta difícil aseverar si es el modelo cinético de orden cero o de primer orden, el que expresa adecuadamente la cinética de la variación del color, manifiestan además, que las constantes cinéticas de pardeamiento, así como la evolución de los azúcares (fructosa, glucosa y sacarosa) y del *HMF*, aumentan con la temperatura de tratamiento, finalmente indican que ensayaron las cinéticas de primer orden con resultados de ajustes de regresión estadística favorables:

$$C_F = C_F^0 \exp(K_1 * t) \quad (15)$$

y otro auto catalítico de segundo orden:

$$C_F = \frac{1}{1/C_0} + B \exp(-K_2 * t) \quad (16)$$

Acertadamente, Ibarz *et al.* (1997), al estudiar el efecto del tratamiento térmico a tres niveles de temperaturas (90°, 80° y 70° C), sobre zumos clarificados de tres variedades de pera (Alexandrine, Douillard y Flor de invierno), con contenido de sólido soluble (52°, 62° y 72° Brix), concluyen que la cinética de

pardeamiento de los zumos, muestran comportamientos cinéticos de orden cero para la evolución de la absorbancia a 420 nm ( $A_{420}$ ), en tanto que la aparición de hidroximetilfurfural (*HMF*) y la desaparición de aminoácidos mostraron una cinética de primer orden, finalmente, al concluir que los zumos de la variedad Alexandrine y Douillard son los que menos se afectan con estos tratamientos térmicos, resaltan la influencia de la composición estructural de éstos materiales frente a la acción de la temperatura en los procesos.

En otro trabajo, Pagán *et al.* (1998), al investigar en un zumo de pera, el efecto de los tratamientos térmicos a 80°, 85°, 90°, 95° y 98° C, en la evolución de diferentes parámetros colorimétricos (absorbancia relativa a 420 nm, diferencia de color, diferencia de croma y parámetros CIELAB), la evolución de las hexosas (glucosa y fructosa) y la desaparición de sacarosa y formación de 5-hidroximetilfurfural, concluyen que principalmente la luminosidad disminuye con el tiempo de tratamiento térmico y con el incremento de la temperatura, siguiendo una dinámica de tonalidades de claro a oscuro, que explica la tendencia al oscurecimiento de las muestras, ajustándose adecuadamente a una cinética de primer orden:

$$\frac{L}{L_0} = \exp(K_{P_1} * t) \quad (17)$$

en tanto que, para el parámetro colorimétrico  $a^*$  indican que muestra las tonalidades verde y roja para el intervalo de  $-a^*$  y  $+a^*$ , mientras que el parámetro  $b^*$  tonalidades azul y amarillo para  $-b^*$  y  $b^*$ , respectivamente, determinándose finalmente la diferencia de color ( $\Delta E^*$ ) a partir de los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , y con el auxilio de la ecuación de Hunter-Scofield:

$$\Delta E^* = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2} \quad (18)$$

En lo referente a la evolución de azúcares y *HMF*, los autores de esta investigación, manifiestan no haber observado una tendencia clara en la evolución de hexosas, pudiendo ser debido a que las hexosas desaparecen del medio de reacción a través de las reacciones de Maillard, caramelización y formación de *HMF*, pero aparecen en el zumo debido a la hidrólisis de la sacarosa, sin embargo, la sacarosa desaparece del medio de reacción, siendo más pronunciada esta desaparición a medida que aumenta la temperatura de tratamiento, y al referirse a la evolución específica de *HMF*, afirman que la aparición de *HMF* es constante y mucho más pronunciada cuando las temperaturas de tratamiento son más elevadas.

Garza *et al.* (2001), al evaluar y modelar cinéticamente los efectos del tratamiento térmico, a temperaturas de: 80°, 85°, 90°, 95° y 98° C, sobre cremogenado concentrado de naranja con contenidos en sólidos solubles de 20°, 30° y 40° Brix, concluyen que la sacarosa se hidroliza ajustándose a un modelo cinético de primer orden, en tanto que para los azúcares reductores, fructosa y glucosa, no lograron definir un modelo cinético que describa adecuadamente su evolución, refieren además que para el caso del ácido ascórbico las energías de activación para una cinética de primer orden, se incrementan con la concentración de sólidos solubles, obteniéndose valores de 105 kJ/mol a 20° Brix y de 156 kJ/mol a 40° Brix, mientras que para el 5-hidroximetilfurfural, las energías de activación disminuyen al incrementarse la concentración de sólidos solubles en las muestras, ajustándose esta tendencia adecuadamente a un modelo cinético auto catalítico, con valores de 108 kJ/mol a 20° Brix y 58 kJ/mol a 40° Brix, siendo similar el comportamiento para las energías de activación de la sacarosa, con valores de 82 kJ/mol a 20° Brix y 74 kJ/mol a 40° Brix. Asimismo, Pagán *et al.* (2001), al experimentar pardeamientos en zumos de frutas, concluye que en el caso del

pardeamiento no enzimático, caracterizado por la formación de polímeros pardos denominados melanoidinas a partir de reacciones químicas que en general se engloban en tres tipos: reacciones de Maillard, de caramelización y descomposición del ácido ascórbico, los factores de mayor influencia sobre la velocidad de las reacciones de Maillard son: la temperatura, la concentración de monosacáridos y aminoácidos, la actividad del agua y el pH.

Buedo *et al.* (2000) destacan el efecto de la temperatura de almacenamiento y la concentración de sólidos solubles en °Brix en el pardeamiento no enzimático de jugo concentrado de melocotón, concluyendo que al comparar con datos correspondientes a otros zumos de fruta almacenada a 37° C, el caso del melocotón es relativamente superior, en tanto que las muestras almacenadas a 3°, 15° y 30° C con una concentración de sólidos solubles en el intervalo de 12° a 89° Brix, muestran una cinética de pardeamiento no enzimático que satisfactoriamente puede ser ajustado a un modelo parabólico. Subrayan además que la tasa máxima de pardeamiento fue hallado a altas concentraciones de sólidos solubles, en tanto que la tasa de pardeamiento por efecto de la temperatura siguió la tendencia de la ecuación del tipo Arrhenius. Refieren finalmente que el jugo concentrado de melocotón almacenado a 3° C no sufrió cambios de color, sugiriendo que es la mejor opción de almacenamiento en lugar de -20° C adoptadas por algunos fabricantes. Del mismo modo, Selen y Karadeniz (2003), al evaluar la cinética de pardeamiento no enzimático de jugos concentrados de manzana a 65°, 70° y 75° Brix, de las variedades Golden Delicious y Amasya, almacenados a 5°, 20° y 37° C, y 37°, 50° y 65° C, concluyen que el nivel de pardeamiento de todos los concentrados, muestran un incremento de reacción con la temperatura, siguiendo una cinética de orden cero, siendo insignificante la influencia de la concentración de los sólidos solubles en la

velocidad de pardeamiento. La concentración de *HMF* reporta valores crecientes: entre 0.52 y 963 mg/kg para el concentrado de manzana de la variedad golden y entre 0.52 y 190 mg/kg para la variedad Amasya.

Chutintrasri y Noomhorm (2005) refieren que luego de estudiar la cinética de degradación de color de puré de piña durante el tratamiento térmico entre 70° – 110° C, que la variación de los parámetros calorimétricos *L* y *b* se ajustaron adecuadamente a un modelo cinético de primer orden, mientras que  $\Delta E$ , valor *a* y el índice de pardeamiento se ajustaron al modelo cinético de orden cero; subrayan además que los resultados sugieren que  $\Delta E$  y la rapidez basado en la energía de activación, son las medidas más sensibles al cambio de color en el intervalo de temperaturas de 70° a 90° C y 95° a 110° C, respectivamente.

Vaikousi *et al.* (2008) estudiaron la cinética del pardeamiento no enzimático de jugo concentrado de manzana a diferentes niveles de actividad de agua (*a<sub>w</sub>*) (entre 0.74 – 0.99), tratadas a temperaturas de 60°, 70°, 80° y 90° C, evaluando la reacción de Maillard mediante medidas espectrofotométricas a 420 nm (*A<sub>420</sub>*), y, al someter los resultados experimentales a los modelos teóricos de; cero y primer orden, Weibull, logístico y parabólico, se reveló que el modelo logístico es el más adecuado para describir el pardeamiento no enzimático del jugo de manzana. Además, tanto la actividad de agua como la temperatura de procesamiento, tienen una influencia significativa sobre la cinética de oscurecimiento del jugo de manzana. Para Leandro *et al.* (2008), que estudiaron el efecto del tratamiento térmico en el cambio de color del jugo clarificado de manzana de marañón, cuando ésta es sometida a temperaturas de entre 88° y 121°C y al evaluar el cambio de color mediante los parámetros calorimétricos (reflectancia, espectro, diferencia de color y CIELAB), el contenido de azúcar remanente es constante

durante el tratamiento térmico y no influye en el pardeamiento no enzimático, en tanto que la degradación del ácido ascórbico, tiene significación notable en el oscurecimiento de la muestra.

Por su parte, Dazhou *et al.* (2008), evaluaron el pardeamiento no enzimático calentando zumo fresco de manzana a 95° C durante 30 y 60 min, almacenándola durante 6 días y utilizando el sistema de fluorescencia front-face excitación-emisión-matrix (*EEM*), con excitación a 355 y 400 nm a intervalos de emisión de 385 – 600, y 430 – 600 nm, determinando que la prueba de los signos señala un aumento de la sensibilidad de la *EEM* en comparación con los indicadores de pardeamiento de uso común, como el índice de pardeamiento no enzimático (*NEBI*), lectura de los parámetros colorimétricos *L\**, *a\**, *b\** y la concentración de 5-HMF. Refieren además que utilizaron el análisis multivariado para estudiar las relaciones de los espectros de emisión de fluorescencia con los indicadores comunes, encontrando que por ejemplo para la predicción del *NEBI*, *b\** y el *HMF*, los coeficientes de correlación estadística son mayores a 0.80. Indican finalmente, que los análisis espectrofotométricos de los productos fluorescentes nuevos formados en el proceso, como el *HMF*, proporcionan un enfoque viable para controlar la ocurrencia del pardeamiento no enzimático del jugo.

Finalmente, Ibarz *et al.* (2010) concluyen que el pardeamiento de los zumos de limón se ve favorecido por el aumento del contenido en sólidos solubles y la temperatura; se aconseja adoptar el modelo de orden cero para evaluar la evolución de *A<sub>420</sub>* y *L\** con el tiempo de tratamiento. El incremento de color ( $\Delta E^*$ ) se ajusta a un modelo cinético en dos etapas simultáneas (una etapa de aparición de color de orden cero y una segunda de destrucción de pigmentos de primer orden):

$$\Delta E^* = K [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (19)$$

Donde:  $K$  es el cociente entre las constantes de la primera y segunda etapa ( $K = k_0/k_1$ );  $k_0$  es la constante cinética de la etapa de aparición de la variable de color, mientras que  $k_1$  la constante cinética de desaparición dicha variable. Los mismos autores argumentan que el contenido en sólidos solubles ejerce una gran influencia sobre el pardeamiento no enzimático de los zumos de limón. Para cuantificar este efecto ajustaron la variación de las constantes cinéticas con el contenido en sólidos solubles a una ecuación tipo exponencial. Finalmente, en el plano colorimétrico determinado por  $a^*$  -  $b^*$  se observa que al aumentar el tiempo de tratamiento de las muestras la tendencia es la de aumentar el valor del parámetro  $a^*$ , lo que indica que los zumos evolucionan hacia tonalidades más rojizas. Esta evolución es más pronunciada a medida que aumenta la temperatura de tratamiento.

### Comportamiento Reológico

Ibarz *et al.* (1989), al estudiar el comportamiento reológico del zumo de manzana, a elevadas concentraciones (69.5°, 65° y 60° Brix) y bajas temperaturas (0° a 10° C) y ambas inclusive, define la ausencia de tixotropía, determinando que el valor del índice de comportamiento al flujo ( $\eta$ ) es muy cercano a la unidad, lo que caracteriza a este fluido como de comportamiento Newtoniano. Destacan asimismo que para la expresión del efecto de la temperatura en el comportamiento reológico del flujo de estos fluidos alimentarios, puede utilizarse la relación tipo Arrhenius como satisfactoria para determinar la variación de la viscosidad ( $k$ ) con la temperatura:

$$k = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (20)$$

Donde  $E_a$ : Energía de activación del flujo, R: Constante de los gases, T: Temperatura en K y  $K_0$ : Constante.

Asimismo, Ibarz *et al.* (1989) estudiaron las propiedades reológicas del jugo clarificado de pera concentradas a 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65° y 71° Brix y tratadas a diez niveles de temperatura entre 5° y 60°C. Ellos concluyeron que el efecto combinado de la temperatura y la concentración para este caso específico, es descrito por el modelo exponencial:

$$k = K_2 \exp\left(\frac{E_a}{RT} + K_3 C + K_4 C^2\right) \quad (21)$$

que al reportar tanto para el ajuste como para los estimados de las constantes una alta significación al nivel del 95% de probabilidad, confirman su uso en esta investigación; aun cuando no dejan de subrayar también, que el efecto de la temperatura y la concentración, pueden ser descritos de manera separada:

$$k = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \\ k = K_1 \exp(A^* C + B^* C^2) \quad (22)$$

respectivamente, siendo  $K_1$ , A y B constantes y C la concentración en °Brix.

Por otro lado, Ibarz *et al.* (1991), al estudiar el comportamiento reológico de jugo clarificado y despectinizado de durazno, argumenta que el efecto de la concentración de sólidos solubles, puede ser descrito por dos modelos matemáticos, siendo la primera del tipo potencial:

$$k = K_1 (C)^{A_1} \quad (23)$$

y la segunda de tipo exponencial:

$$k = K_2 \exp(A_2 C) \quad (24)$$

donde  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $A_1$  y  $A_2$  son constantes, mientras que C es la concentración del jugo en °Brix. Concluyen además, que al estudiar el efecto combinado de la temperatura y la



concentración de sólidos solubles, sobre la variación de la viscosidad, determinaron que los valores de  $E_a$  y  $K_0$  se ajustaron satisfactoriamente a los modelos siguientes:

$$E_a = 1148 \exp(0.0346 * C) \quad (r=0.997) \quad (25)$$

$$K_0 = 6.46 \exp(-0.343 * C) \quad (r=0.996) \quad (26)$$

También Ibarz *et al.* (1991), al estudiar la reología de jugo clarificado de grosella negra despectinizado, a temperaturas entre 5° y 60 °C y a concentraciones de sólidos solubles entre 35° y 64.5° Brix, define que se ajusta al modelo Newtoniano:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (27)$$

indicando además que el efecto de la temperatura sobre la variación de la viscosidad es descrito por un modelo cinético del tipo Arrhenius, encontrándose que la energía de activación del flujo viscoso está entre 4.55 y 10.57 kcal/gmol, con notoria dependencia de la concentración. En tanto el efecto de la concentración puede ser descrito por dos ecuaciones, una correspondiente a la ley de la potencia

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (28)$$

$$\eta = \eta_1(C)^{b_1} \quad (29)$$

y otra exponencial

$$\eta = \eta_2 \exp(b_2 C) \quad (30)$$

siendo  $\eta_i$  y  $b_i$  constantes y  $C$  la concentración en °Brix. Finalmente es importante destacar que estos autores establecen una ecuación que define los efectos de la actividad de agua y la temperatura sobre la viscosidad dinámica, siendo:

$$\eta = 2.13 \times 10^{-5} (a_w)^{-17.6} \exp(3380/T) \quad (31)$$

donde  $a_w$  es la actividad de agua.

Del mismo modo, Ibarz *et al.* (1992), al ensayar diversos parámetros reológicos en muestras de pulpas concentradas de ciruela y melocotón, con 26.3 % y 34.2 % de concentración de sólidos solubles y a intervalos de temperaturas de 30 a 55°C, determina que ambos productos muestran una ligera tixotropía, caracterizada por una cinética de primer orden, en tanto que el comportamiento al flujo fue bien representado por el modelo de la potencia:

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (32)$$

siendo también similar el índice de comportamiento al flujo para ambas muestras, en tanto que el efecto de la temperatura fue representado por una ecuación del tipo Arrhenius.

También Ibarz *et al.* (1993), al estudiar la reología del jugo clarificado de naranja, resalta además de la definición del comportamiento newtoniano de la muestra y el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico, el efecto de la concentración de sólidos solubles sobre este comportamiento reológico, pudiéndose describir en este último caso, por una ecuación de la ley de potencia:

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (33)$$

y una exponencial

$$\eta = \eta_1(C)^{b_1} \text{ y } \eta = \eta_2 \exp(b_2 C) \quad (34)$$

mientras que la viscosidad dinámica del jugo de naranja despectinizado y clarificado depende de la temperatura y la actividad de agua, siendo la ecuación el siguiente:

$$\eta = 1.03 \times 10^{-4} (a_w)^{-19.9} \exp(3065/T) \quad (35)$$

Lozano e Ibarz (1994), al estudiar el comportamiento tixotrópico de una muestra de pulpa de melocotón, a concentraciones de

sólidos solubles de 26°, 30° y 34.2° Brix, define que el tiempo de evolución del esfuerzo de corte a una velocidad angular de deformación ( $dv/dy$ ) de  $1.0 \text{ s}^{-1}$  fue aceptablemente representado por una cinética de primer orden, en tanto que el equilibrio final del esfuerzo de corte está relacionado linealmente con el incremento de los sólidos solubles. Además determinaron diferencias considerables entre los parámetros tixotrópicos al comparar muestras de pulpas de melocotón y ciruela a las mismas concentraciones de sólidos solubles, pectina y niveles de fibra, asumiendo teóricamente que la diferencia encontrada entre los comportamientos tixotrópicos de estas dos pulpas, se atribuye a la estructura microscópica de las pulpas. Por su parte, Ibarz *et al.* (1994), al estudiar el comportamiento reológico de jugo de Kiwi con concentraciones de 22.5° a 63.0° Brix y a temperaturas de 4° hasta 70°C, concluyen que a concentraciones por debajo de 55.7° Brix, el comportamiento reológico se ajusta al modelo de la ley de la potencia:

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n \quad (36)$$

mientras que a concentraciones por encima de 55.7°Brix, se ajusta a la ecuación de Herschel-Bulkley:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (37)$$

Del mismo modo Ibarz *et al.* (1995) indica que al estudiar el comportamiento reológico del jugo de endrina con bajo contenido de pulpa y pectinas, determinaron que los jugos conteniendo pectina y pulpa se comportan como fluidos no Newtonianos con crecimiento del esfuerzo de corte, siendo el modelo de Bingham:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta(\dot{\gamma}) \quad (38)$$

utilizado para describir la relación entre el esfuerzo de corte y la proporción de

deformación. Refieren también que el efecto de la temperatura sobre la viscosidad plástica, es definida óptimamente por una ecuación del tipo Arrhenius, mientras que el efecto del contenido de sólidos solubles puede describirse por dos tipos de ecuaciones, una correspondiente a la ley de la potencia:

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (39)$$

y una segunda correspondiente a una expresión exponencial

$$\eta = \eta_1(C)^{b_1} \quad (40)$$

$$\eta = \eta_2 \exp(b_2 C) \quad (41)$$

en tanto que el efecto combinado de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad plástica lo describe satisfactoriamente la ecuación:

$$k = K_3 \exp\left(\frac{E_a}{RT} + b_3 C\right) \quad (42)$$

Para este caso específico los parámetros resultan:  $K_3 = 3.40 \times 10^{-5} \text{ mPa.s}$ ,  $b_3 = 0.103 \pm 0.004 \text{ °Brix}^{-1}$  y  $E_a = 5.38 \pm 0.80 \text{ kcal/mol}$ .

Resultados similares fueron también obtenidos por Ibarz *et al.* (1996), al estudiar el comportamiento reológico de dos muestras de jugo de níspero. Ellos concluyeron que los jugos con contenido de pulpa y pectina, mostraron un comportamiento no Newtoniano con incremento del esfuerzo de corte, mientras que cuando se extrae la pulpa y la pectina, tienen comportamiento Newtoniano. Para Giner *et al.* (1996), que estudiaron el comportamiento reológico del jugo de cereza con concentraciones de sólidos solubles entre 22° a 74°Brix y a temperaturas entre 5° a 70°C, las muestras tienen comportamiento newtoniano, destacando que el efecto combinado de la temperatura y el contenido de sólidos solubles, en este caso específico se ajusta óptimamente a la ecuación:

$$k = 1.12 \times 10^{-6} \exp(0.09C + 3523/T) \quad (43)$$

Villarán *et al.* (1997), al estudiar el comportamiento reológico de mermelada comercial de albaricoque (*Prunus armeniaca*) elaborada con sacarosa y de mermeladas de arandino (*Vaccinium myrtillus*) y de escaramujo (*Rosa canina*) preparados con fructosa para uso dietético, en el intervalo de temperaturas de 5° a 65°C, determinaron que las tres muestras tuvieron un comportamiento tixotrópico que se ajusta a una cinética de primer orden, en tanto que el comportamiento de flujo de las muestras a distintas temperaturas, se describen óptimamente mediante las ecuaciones de Herschel-Bulkley:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (44)$$

y ley de la potencia

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (45)$$

indicando además, que la variación de la viscosidad aparente con la temperatura se relaciona con la ecuación de Arrhenius-Guzman:

$$\mu_a = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (46)$$

que expresa una disminución exponencial.

Ramos *et al.* (1998) reportan que el jugo de naranja con contenido de pulpa y pectina, con concentraciones de sólidos soluble de 55° y 60°Brix, con proporción de deformación de 7.2 hasta 57.6 s<sup>-1</sup> y en el rango de temperaturas de 0° a 20°C, muestra un comportamiento tixotrópico, remarcando que este comportamiento crece con el incremento de la concentración de sólidos y la disminución de la temperatura. Refieren también que la estructura tixotrópica del jugo de naranja, cuando es sometida a una proporción de deformación de 57.6 s<sup>-1</sup> se destruye en 5 minutos, mientras que para el

puré de membrillo se requieren 10 minutos, mostrando este último mayores características tixotrópicas.

Pelegrine *et al.* (2002) estudiaron el comportamiento reológico de pulpa entera y centrifugada de mango y piña, en un viscosímetro rotacional Haake Rotovisco RV-20 y a 30°C, conduciendo el experimento con una medición en el sistema de 45 mm de diámetro en platos paralelos (PQ45) con una luz entre platos de 0.5 mm y con una proporción de deformación por encima de 874 s<sup>-1</sup> y ajustando los reogramas a los modelos Casson, Oswald-of-Waelle y Mizrahi-berk (M-B), determinando que el mejor ajuste fue logrado con el model M-B, observando que las pulpas muestran comportamiento pseudoplástico y el contenido de sólidos solubles tienen gran influencia en el índice de consistencia. Mientras que para Hamniniuk *et al.* (2005), que experimentan el comportamiento reológico de una pulpa integra de arazá, en un reómetro de cilindros concéntricos Brookfield con husillo rotacional SC4-27 y para un intervalo de proporción de deformación de 2.80 a 70 s<sup>-1</sup>, el comportamiento se describe apropiadamente por el modelo de la ley de la potencia, en tanto que la viscosidad decrece con el incremento de la temperatura, habiéndose determinado esta disminución de la viscosidad hasta 60°C. Asimismo reportan que el modelo de Arrhenius, describe muy bien el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa, siendo la energía de activación ( $E_a$ ) para este caso específico de 11.03 kJ/mol para una velocidad angular de deformación de 50 s<sup>-1</sup>.

Nindo *et al.* (2007) al estudiar el comportamiento reológico del puré de arándano, en el rango de velocidad de deformación de 10 a 1000 s<sup>-1</sup>, determinaron que el comportamiento reológico del puré es bien descrito por el modelo three-parameter Sisko, resaltando que la energía de activación del flujo ( $E_a$ ) calculado con respecto a la

viscosidad aparente a  $100 \text{ s}^{-1}$ , se incrementó de 11.4 a 17.1 kJ/mol, para el puré con 10% y 25% de sólidos solubles respectivamente, mientras que para el coeficiente de consistencia, la energía de activación varió entre 10.7 y 21.7 kJ/mol en el rango de contenido de sólidos solubles indicado. Para Maceiras *et al.* (2007), quienes estudiaron el comportamiento reológico de purés de frambuesa, fresa, durazno y ciruela, mediante un viscosímetro rotacional, utilizando intervalo de temperaturas de 20 a 40°C, velocidad angular de deformación de  $17.8$  a  $445 \text{ s}^{-1}$  y analizando los resultados experimentales empleando los modelos reológicos de Ostwald Waele:

$$\sigma = \eta(\dot{\gamma})^n \quad (47)$$

y Herschel-Bulkley

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (48)$$

las muestras se ajustan razonablemente a estos modelos teóricos con un  $R^2 = 0.998$ , indican además que proponen modelos lineales para correlacionar los parámetros reológicos con la temperatura y que las medidas experimentales encontrados para los purés estudiados muestran un comportamiento no Newtoniano, en tanto que la viscosidad aparente es influenciado por el cocimiento.

Chin *et al.* (2009) modelaron el comportamiento reológico de jugo de pomelo concentrado por congelación usando un viscosímetro rotacional con velocidades de deformación de 1 hasta  $400 \text{ s}^{-1}$ , determinando que el efecto de la concentración, medido en contenido de sólidos solubles, muestra una tendencia hacia una pseudo-plasticidad con un índice de comportamiento de flujo ( $\eta < 1$ ), en tanto que el incremento de la temperatura de 6° hasta 75°C, produce un efecto inverso al comportamiento pseudo plástico con notable incremento de los valores de  $\eta$ , para las tres concentraciones investigadas (20°, 30° y

50°Brix), en tanto que el coeficiente de consistencia decrece con la temperatura incrementándose con el contenido de sólidos solubles totales. Finalmente manifiestan que al modelar el comportamiento reológico del jugo de pomelo concentrado, usando el master-curve o curva maestro, determinaron que por encima del rango de temperaturas se superponen en una línea individual, lo cual permite la generalización del comportamiento del flujo y sus características. Asimismo indican que el master-curve o curva maestro ha confirmado que la viscosidad y la pseudo plasticidad del jugo se incrementa con la concentración, mostrando un coeficiente de regresión de  $R^2 = 0.98$ .

### 3. Apreciación crítica y conclusiones

De los resultados sobre cinéticas de pardeamiento no enzimático y el comportamiento reológico, en jugos clarificados, concentrados y pulpas de frutas, se destacan los siguientes aportes:

- (a) Estructuración de una metodología científica contrastada experimentalmente sobre cinéticas de pardeamiento no enzimático y el comportamiento reológico en jugos clarificados y concentrados de frutas, aplicables a nuevas investigaciones con materiales similares.
- (b) Se consolida teórica y experimentalmente que la cinética de pardeamiento no enzimático es influenciado principalmente por la variación de la temperatura, concentración de sólidos solubles, actividad de agua y el pH, mientras que el comportamiento reológico muestra mayores variaciones con los cambios de temperatura y la homogeneidad en el tamaño de las partículas, en el caso de las suspensiones y pulpas.

- (c) Se aporta un valor tecnológico importante para las industrias específicas, al definir los niveles de severidad en los procesos de tratamiento térmico, con objetivos claros de preservar el atributo de color, como un factor organoléptico preponderante en la comercialización de los jugos clarificados y concentrados de frutas. Asimismo aportan con valores reales de comportamiento reológico, que se convierte en el factor principal de diseño en los sistemas de transporte como bombas, ductos y accesorios.

## Referencias

- Braverman, J. 1980. Introducción a la bioquímica de los alimentos. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Buedo, A.; Elustondo, M.; Urbicain, M. 2000. Non enzymatic browning of peach juice concentrate during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 1(4): 255-260.
- Chin, N.; Chan, S.; Yusof, Y.; Chuah, T.; Talib, R. 2009. Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-cure. *Journal of Food Engineering* 93(2): 134-140.
- Chutintrasri, B.; Noomhorm, A. 2007. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT - Food Science and Technology* 40(2): 300-306.
- Dazhou, Z.; Baoping, J.; Hyang, L.; Zude, M. 2009. Evaluation of the non-enzymatic browning in thermally processed apple juice by tront-tace fluorescence spectroscopy. *Food Chemistry* 113(1): 272-279.
- Garza, S.; Giner, J.; Martin, O.; Costa, E.; Ibarz, A. 1996. Colour, sugars and HMF evolution during thermal treatment of apple juice. *Food Science and Technology International* 2: 101-110.
- Garza, S.; Ibarz, A.; Boix, J. 2001. Modelos cinéticos de degradación en cremogenado de naranja concentrado tratado a elevadas temperaturas. *Revista Alimentaria* 1: 111.
- Giner, J.; Ibarz, A.; Garza, S.; Xhian-Quan, S. 1996. Rheology of clarified cherry juices. *Journal of Engineering* 30: 147-154.
- González, C.; Ibarz, A.; Esplugas, S.; Vicente, M. 1988. Cinética de pardeamiento enzimático en zumos de frutas. *Alimentaria* 198: 53-60.
- Ibarz, A.; Aguado, M. 1988. Comportamiento reológico del zumo de manzana despectinizado a elevadas concentraciones y bajas temperaturas. *Revista Alimentaria* 25(189): 65-72.
- Ibarz, A.; Casero, T.; Miguelsanz, R.; Pagán, J. 1989. Efecto de la temperatura en la cinética de pardeamiento no enzimático en zumos clarificados de pera con diferente contenido de sólidos solubles. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 29: 530-537.
- Ibarz, A.; Pagán, J.; Gutierrez, J.; Vicente, M. 1989. Rheological properties of clarified pear juice concentrates. *Journal of Food Engineering* 10: 57-63.
- Ibarz, A.; Casero, T.; Miguelsanz, R.; Pagán, J. 1989a. Cinéticas de formación de hidroximetilfurfural en concentrado de zumo de pera almacenado a distintas temperaturas. *Revista Alimentaria* 199: 81-84.
- Ibarz, A.; Casero, T.; Miguelsanz, R.; Pagán, J. 1989b. Cinética de pardeamiento no enzimático de zumo de pera almacenado a distintas temperaturas. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 29(3): 407-413.
- Ibarz, A.; Pagán, J.; Miguelsanz, R. 1991. Rheology of clarified fruit juices I: Peach juices. *Journal of Food Engineering* 12: 63-73.
- Ibarz, A.; Gonzales, C.; Esplugas, S.; Vicente, M. 1992. Rheology of clarified fruit juices. I: Peach Juices. *Journal of Food Engineering* 15: 49-61.
- Ibarz, A.; Pagán, J.; Miguelsanz, R. 1992. Rheology of clarified fruit juices. II: Blackcurrant juices. *Journal of Food Engineering* 15: 63-73.
- Ibarz, A.; Lozano, J. 1992. Rheology of concentrated peach and plum pulps. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos* 32(1): 85-94.
- Ibarz, A.; Gonzáles, C.; Espulgas, S. 1994. Rheology of clarified fruit juices. III: Orange juices. *Journal of Food Engineering* 21: 485-494.
- Ibarz, A.; Miguelsanz, R.; Pagán, J. 1993. The effect of high temperatures on nonenzymatic browning and formation of HMF in clarified peach juices. *Fruit Processing Julio*: 262-265.
- Ibarz, A.; Giner, J.; Pagán, J.; Gimeno, V.; Garza, S. 1995. Rheological behaviour of kivi fruit juice concentrates. *Journal of Texture Studies* 26: 137-145.
- Ibarz, A.; Garvin, A.; Costa, J. 1996. Rheological behaviour of sloe (*Prunus spinosa*) fruit juices. *Journal of Food Engineering* 27: 423-430.
- Ibarz, A.; Naves, J. 1995. Efecto de la temperatura y contenido en sólidos solubles sobre la cinética de pardeamiento no enzimático de zumos clarificados de manzana. *Food Science Technology International* 1: 29-34.
- Ibarz, A.; Garvin, A.; Costa, J. 1996. Rheological behaviour of loquat (*Eriobotrya japonica*) juices. *Journal of Texture Studies* 27: 175-184.
- Ibarz, R.; Pagán, J.; Garza, S.; Ibarz, A. 2010. Pardeamiento de zumos clarificados de limón tratados a altas temperaturas. *Scientia Agropecuaria* 1(1): 7-20.
- Ibarz, A.; Martin, O.; Barbosa-Cánovas, G. 1997. Non-enzymatic browning kinetics of concentrated pear juice. *Food Science and Technology International* 3: 213-218.
- Ibarz, A. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Pagán, J.; Ibarz, A.; Garza, S. 1998. Evolución del color, HMF y azúcares en un zumo clarificado de pera tratado térmicamente. *Revista Alimentaria* 298: 87-94.
- Leandro, F.; Damasceno, F.; Fernández, A.; Magalhaes, M.; Brito, E. 2008. Non-enzymatic browning in clarified cashew apple juice during thermal treatment: Kinetics and process control. *Food Chemistry* 106(1): 172-179.
- Lozano, J.; Ibarz, A. 1994. Thixotropic behaviour of concentrated fruit pulps. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 27(1): 16-18.

- Maceiras, R.; Alvarez, E.; Cancela, M. 2007. Rheological properties of fruit purees: Effect of cooking. *Journal of Food Engineering* 80(3): 763-769.
- Muller, H. 1978. Introducción a la reología de los alimentos. Editorial Acribia S.A., Zaragoza, España.
- Nindo, C.I.; Tang, J.; Powers, J.; Takhar, P. 2007. Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT - Food Science and Technology* 40(2): 292-299.
- Pagán, J.; Ibarz, A.; Garza, S. 2001. Pardeamientos en zumos de frutas. *Revista Alimentaria* 328: 97-106.
- Pelegrine, D.; Silva, F.; Gasparetto, C. 2002. Rheological behaviour of pineapple and mango pulps. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 35(8): 645-648.
- Ramos, A.; Ibarz, A. 1998. Thixotropy of orange concentrate and quince puree. *J. of Texture Studies* 29: 313-324.
- Remacha, J.; Ibarz, A.; Giner, J. 1992. Evolución del color por efecto de la temperatura en pulpas de fruta. *Revista Alimentaria* 234: 59-68.
- Selen, H.; Karadeniz, F. 2003. Effect of storage on nonenzymatic browning of apple juice concentrates. *Food Chemistry* 80(1): 91-97.
- Vaikousi, H.; Koutsoumanis, K.; Biliaderis, C. 2008. Kinetic modelling of non-enzymatic browning of apple juice concentrates differing in water activity under isothermal and dynamic heating conditions. *Food Chemistry* 107(2): 785-796.
- Villarán, M.; Cepeda, E.; Llorens, F.; Ibarz, A. 1997. Influence of temperature on rheological behaviour of jams of apricot (*Prunus armeniaca*), bilberry (*Vaccinium myrtillus*) and rose hip (*Rosa canina*). *Food Science and Technology International* 3: 13-19.